

# 第五章 半导体探测器

§ 5-1 半导体探测器基础

§ 5-2 硅微条探测器的结构和原理

§ 5-3 半导体探测器的发展

§ 5-4 半导体探测器的应用

# § 5-1 半导体探测器基础

## 一、半导体的基本知识

### 1. 导体、半导体、绝缘体的能带

物体导电是物体内部电子在外电场作用下定向运动的结果。

由于电场力对电子的作用，使电子的运动速度和能量发生变化。

从能带论来看，电子能量变化就是电子从一个能级跃迁到另一个能级上。

- **满带：**能级已被电子所占满，一般外电场作用时，其电子不形成电流，对导电没有贡献，亦称价带。
- **导带：**能带被电子部分占满，在外电场作用下，电子从外电场吸收能量跃迁到未被电子占据的能级上去，形成电流，起导电作用。
- **禁带：**满带和导带之间的禁区称为禁带，其宽度也称为能隙，记做  $E_g$ 。

■ 半导体和绝缘体之间的差别在于禁带宽度不同：

半导体禁带较窄， $E_g=0.1-2.2\text{eV}$

绝缘体禁带较宽， $E_g=5-10\text{eV}$

由于能带取决于原子间距，所以 $E_g$ 与温度和压力有关。一般禁带宽度大的材料，耐高温性能和耐辐照性能好。

- 一般情况下，半导体的满带完全被电子占满，导带中没有电子。在热力学温度为零时，即使有外电场作用，它们并不导电。但是当温度升高或有光照时，半导体满带中少量电子会获得能量而被激发到导带上，这些电子在外电场作用下将参与导电。同时满带中留下的空穴也参与导电。

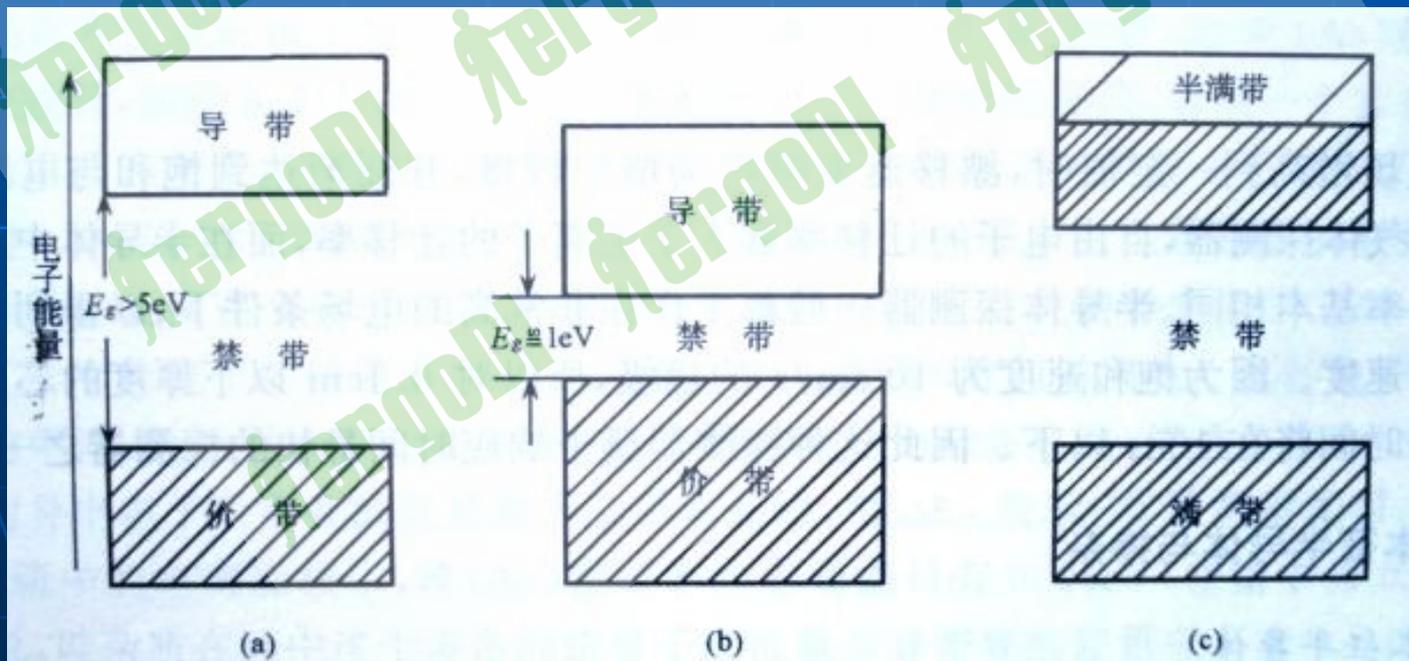


图 8.1 绝缘体、半导体和导体的能带结构示意图

## 2. 电荷载流子及其在电场中的迁移

- 载流子：是电子和空穴的统称。
- 在单位时间内，因受热激发而产生电子-空穴对的几率为

$$p(T) = CT^{3/2} e^{-E_g/2kT}$$

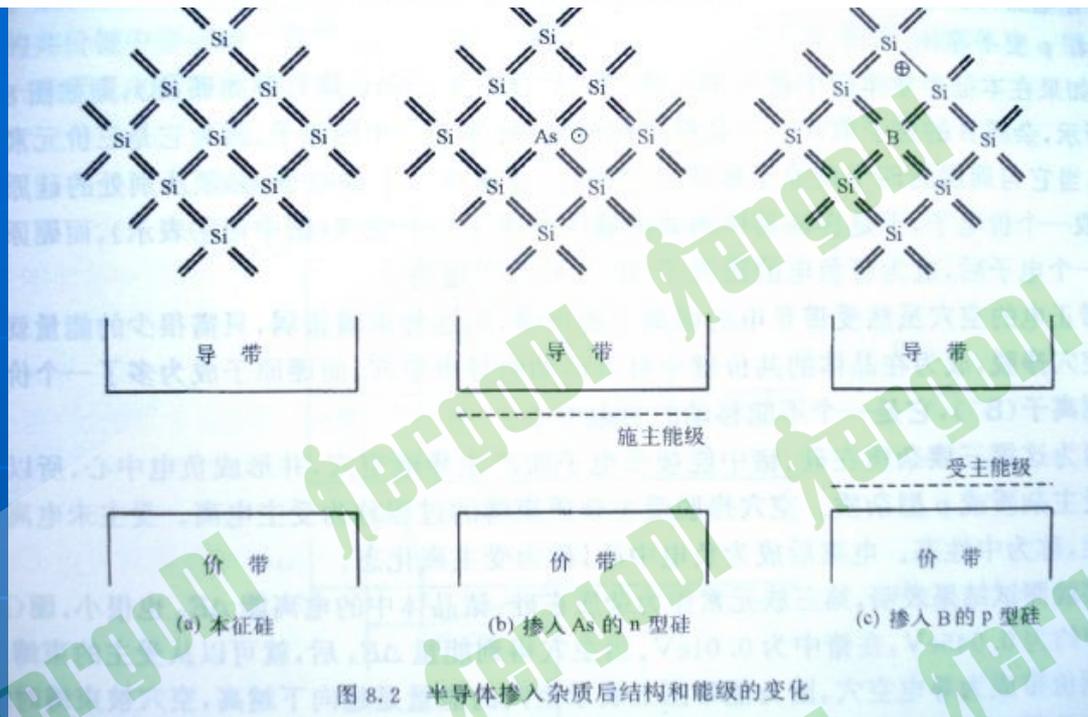
取决于禁带宽度 $E_g$ 和绝对温度 $T$ 的比。

- 外加电场时，电子和空穴都运动，方向相反。
  - ✓ 若电场不高，漂移速度正比于外加电场 $E$ 

$$v = \mu E, \quad \mu = e\tau/2m$$
 为迁移率
    - 气体探测器，电子的迁移率远大于正离子；
    - 半导体中，电子和空穴的迁移率基本相同。
  - ✓ 当电场逐渐增高时，漂移速度随电场增加变慢，并最后达到饱和。
  - ✓ 半导体探测器一般都工作在非常高的电场条件下，以得到电荷载流子的饱和速度， $\sim 10^7 \text{cm/s}$ 。  
当芯片厚度为 $0.1 \text{cm}$ 时，收集时间 $\sim 10 \text{ns}$ 。  
具有非常快的时间响应。

### 3. 本征半导体与掺杂

- 理想的不含杂质的半导体称为本征半导体，导带上的电子数目严格等于满带上的空穴数目， $n=p$ 。
- 掺杂：在本征半导体内掺入杂质，来改变半导体材料的性能。
  - **N型**（电子型）半导体：导带内电子运动。
  - **P型**（空穴型）半导体：满带内空穴运动。



掺入五价元素：**P(磷)**、**As(砷)**、**Sb(锑)**、**Li(锂)**等。五价元素原子的第5个价电子都激发到导带中参与导电，五价元素原子成为正离子，是不能移动的正电中心。这种半导体的导电主要是电子贡献，称作电子型或**N型**半导体。

把电子贡献给导带的杂质称为施主杂质，杂质能级叫施主能级，位于导带底部。

掺入三价元素：**B(硼)**、**Al(铝)**、**Ga(镓)**、**In(铟)**。三价元素原子有从附近吸收一个电子的趋势，而在价带中产生空穴。在室温下三价元素原子几乎都形成负离子，是不能移动的负电中心，这种半导体的导电主要是空穴的贡献，称作空穴型或**P型**半导体。

能接受价带中电子而产生导电空穴的杂质称为受主杂质。在价带上面形成的新的能级叫受主能级，位于价带的顶部。

- 对于掺杂半导体，除了本征激发产生的电子空穴对以外，还有施主杂质提供的电子和受主杂质提供的空穴，所以电子和空穴的浓度不相等。

$$\text{在N型半导体中, } n = n_{\text{施}}, p = \frac{n_i^2}{n_{\text{施}}}$$

$$\text{在P型半导体中, } p = p_{\text{受}}, n = \frac{n_i^2}{p_{\text{受}}}$$

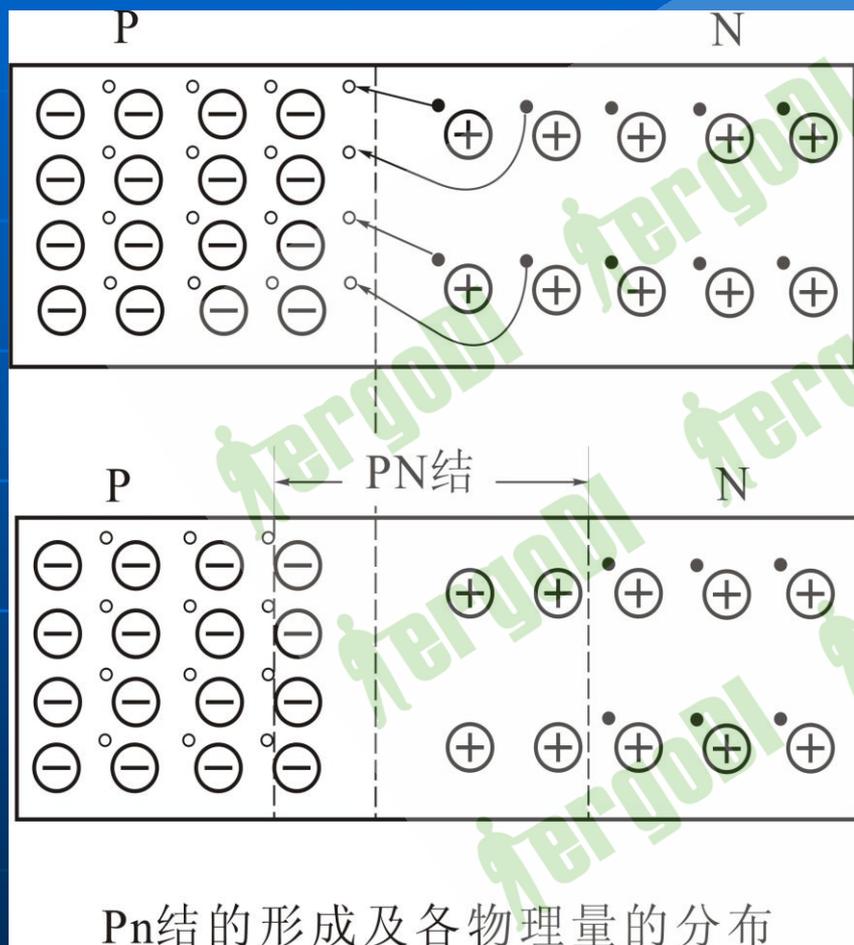
### 结构缺陷

**点缺陷:** 晶格上出现空位或应该空位处出现了原子。

**线缺陷:** 晶体受应力作用发生错位（沿平面滑移）。

晶格缺陷也能俘获或放出电子，相当于在晶体禁带中附加受主或施主能级，也起受主或施主作用。

## 4、PN结 (pn junction)



**结合前**，N区的电子比P区多，P区的空穴比N区多。

**结合后**，电子由N区向P区扩散与空穴复合；空穴由P区向N区扩散与电子复合。扩散的结果形成**PN结**。

**在PN结区**，电子空穴很少，剩下的杂质正负离子形成空间电荷区，其内建电场方向由N区指向P区，阻止电子、空穴继续扩散，并造成少数载流子的反向漂移运动。当扩散运动和反向漂移运动达到平衡时，P区或N区的电子空穴浓度就不再变化。

这个由不可移动的杂质离子组成的空间电荷区，即PN结区，对电导率没有贡献，而载流子的密度非常低，亦称耗尽区，阻挡层，势垒区。

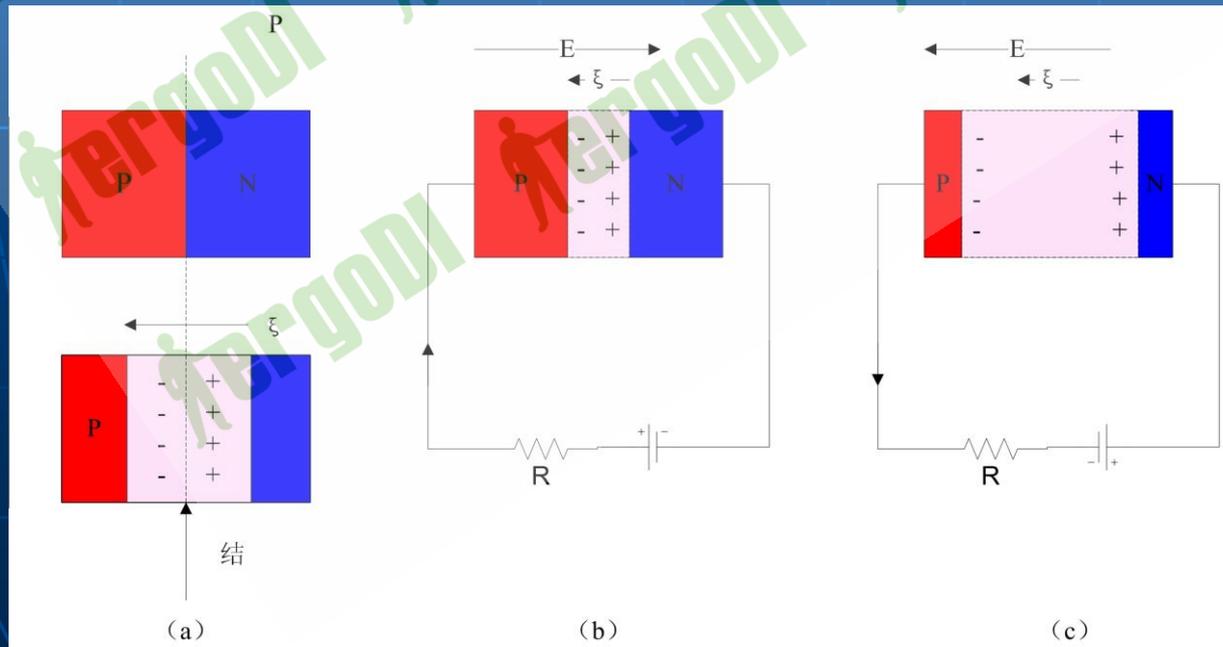
# 半导体探测器的灵敏区

半导体PN结可作为灵敏区

- 1) 在PN结区可移动的载流子基本被耗尽，只留下电离了的正负电中心，对电导率无贡献，其具有很高的电阻率。
- 2) PN结加上一定负偏压，耗尽区扩展，可达全耗尽，死层极薄，外加电压几乎全部加到PN结上，形成很高电场。
- 3) 漏电流很小，有很好的信噪比。
- 4) 当有带电粒子通过时，产生的电子-空穴对，在强电场的作用下，很快地迁移出耗尽区，在电极上产生信号。

# 5. PN结的偏压特性

- 当**PN**结不加偏压时，能起到一定的探测器作用，但性能很差  
自发形成的电场低，不利于收集；耗尽区薄，信噪比差
- 当**PN**结加正向偏压时，加很低的电压，也会有很大的电流，信号将被淹没，无法作为探测器
- 加反向电压，**N**区接正，**P**区接负，外加电场方向与内建电场方向相同，使耗尽层增厚，漂移运动增强。当带电粒子穿过时产生电子-空穴对，在高电场下分别向正负电极漂移，产生信号。信号幅度正比于电子空穴对数目，正比于入射粒子损失能量。所以加反向偏压的**PN**结就是结型半导体探测器的灵敏区。



## 6. 半导体探测器的特点

### ■ 优点:

#### 1) 非常好的位置分辨

- 这是硅微条探测器最突出的特点。它的位置分辨率是目前应用的各种探测器中最高的, 目前可做到 **1.4 $\mu\text{m}$** 。
- 主要因为固体的密度比气体大**100** 倍左右, 带电粒子穿过探测器, 产生的电子-空穴对(**e-h**) 的密度非常高, 大约为 **110e-h/ $\mu\text{m}$** 。
- 另外由于现代半导体技术工艺, 光刻技术及高集成度低噪声读出电子学的飞速发展, 每个读出条可对应一路读出电子学, 更有利于空间分辨率的提高。

## 2) 很高的能量分辨率

$$R = 2.354 \sqrt{\frac{F}{N}} = 2.354 \sqrt{\frac{F \varepsilon_0}{E}}$$

- 半导体探测器的能量分辨率比气体探测器大约高一个数量级, 比闪烁计数器高得更多。
- 这是因为在硅半导体中电离产生一对电子-空穴对只需要**3eV**左右的能量, 而气体中产生一对离子对所需能量大约为**30eV**, 塑料闪烁探测器在光阴极上产生一个光电子需要的能量大约为**300eV**。带电粒子在硅半导体中的能量损失也很高, 在硅晶体中, 能量损失大约**390eV/ $\mu\text{m}$** 。因此, 同样能量的带电粒子在半导体中产生的电子-空穴对数要比气体中产生的离子对高一个数量级以上。这样电荷数的相对统计涨落也比气体小很多。
- 法诺因子**F**也小。  
 硅  **$F \approx 0.10$** , 锗  **$F \approx 0.06$**   
 气体  **$F \approx 0.4$**   
 闪烁体  **$F = 1$**

### 3) 能量线性很好

半导体的平均电离功与入射粒子的能量和种类以及探测器的类型无关，只要所产生的电子空穴对全部被收集，探测器输出脉冲与入射粒子能量成正比。

半导体探测器对各种粒子都有良好的能量线性。

### 4) 非常快的响应时间

在半导体探测器中，由于采用微电子工艺的半导体探测器很薄，它的电荷在很小的区域里收集，响应时间非常快，一般可达到5n s左右。因此，可以实现高计数率，可超过 $10^8/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。

### 5) 体积可做得很小

由于硅半导体密度大，有一定的刚度，它可以做得很薄并能自身支持，典型的厚度是 $300\mu\text{m}$ 左右，当带电粒子穿过时，大约可产生 $3.2 \times 10^4$ 电子-空穴对。有的还可做得更薄，整个探测器可以做得很小。

## 6) 抗磁场性能好

对磁场( $B < 10\text{KG}$ )不灵敏。

### ■ 缺点：对辐射损伤比较灵敏

- 半导体探测器的辐照损伤很严重。因为辐照在半导体中会造成晶格缺陷，致使半导体探测器的漏电流增大，性能下降。
- 辐射损伤与辐射种类、剂量率以及辐照时间和条件有关。
- 各国科学家就此问题从技术上正在进行不断地改进提高。

# § 5-2 硅微条探测器的结构和原理

## Silicon Micro strip Detector (SMD)

### 硅微条探测器的结构

#### 电触点

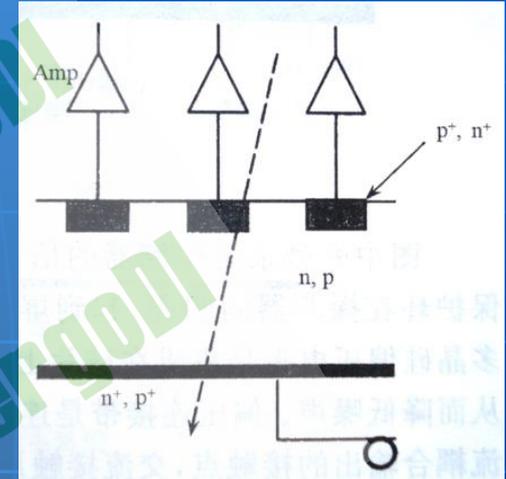
- 欧姆触点（导电电极）  
保持半导体内载流子浓度平衡，漏电流大。
- 闭锁电极  
半导体内载流子浓度下降，漏电流小。  
一般就是半导体PN结的两个面。  
**P<sup>+</sup>，N<sup>+</sup>**：杂质浓度很高的半导体薄层。

$$W_P = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_B}{qN_P(1 + N_P/N_N)}}$$

$$W_N = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_B}{qN_N(1 + N_N/N_P)}}$$

由此可见，耗尽层两边的宽度反比于杂质的浓度，选择  $N_P \gg N_N$ ，耗尽层N型的一边特别宽，P边很窄，即 **P<sup>+</sup>N**。

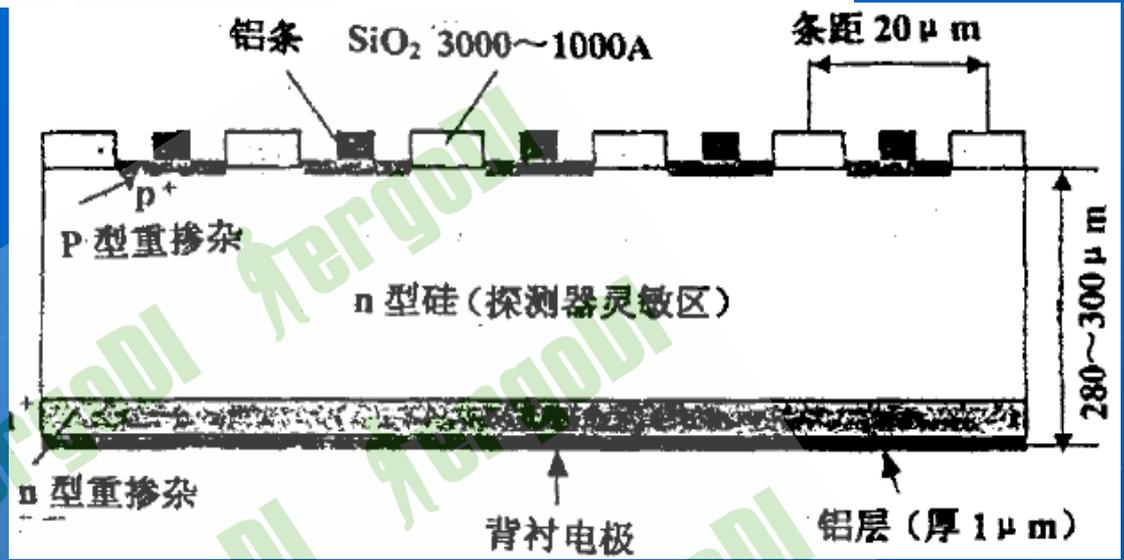
如： $N_P = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ， $N_N = 5 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ ， $V_B = 100 \text{V}$   
则  $W_P = 0.4 \mu\text{m}$ ， $W_N = 300 \mu\text{m}$



常采用 **P<sup>+</sup>NN<sup>+</sup>**

# 结构

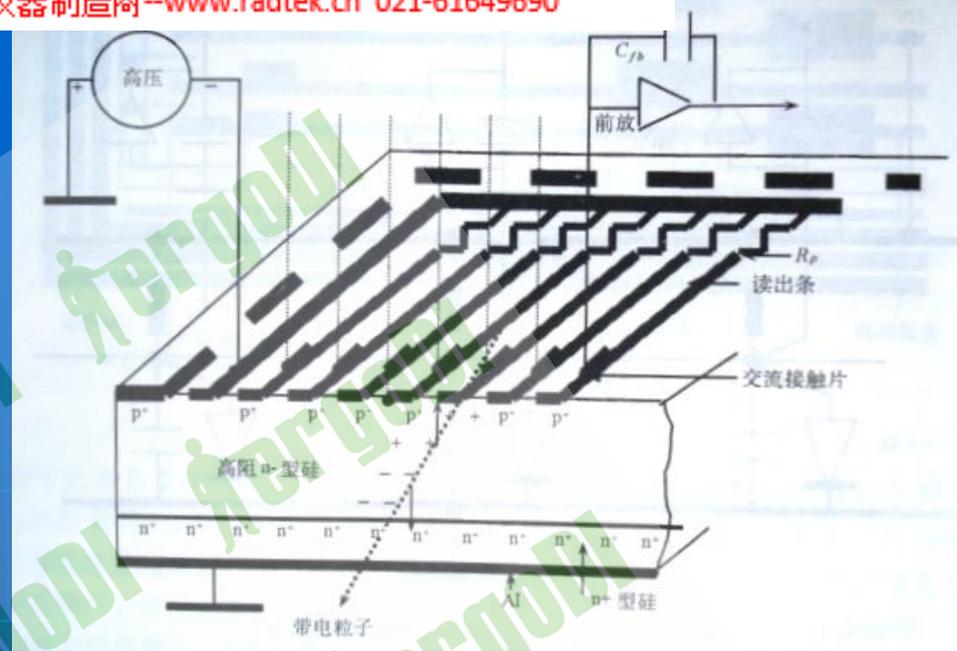
- ✓ 薄铝条、 $\text{SiO}_2$ 隔离条、重掺 $\text{P}^+$ 条
- ✓  $\sim 300\mu\text{m}$ 厚的 $\text{N}$ 型硅基，灵敏区
- ✓ 重掺 $\text{N}^+$ 层和铝薄膜组成的背衬电极



- ✓ 微条（信号读出条），条距决定空间分辨率
- ✓ 保护环，屏蔽（噪声、辐照）
- ✓ 偏压连接带、电阻
- ✓ 直流、交流接触片，信号通过它们连接前放。



- 硅微条探测器是在一个n型硅片的表面上,通过氧化和离子注入法,局部扩散法或表面位垒法及光刻等技术工艺制作成的。
- 其表面是均匀平行的附有一层铝膜的重掺杂p<sup>+</sup>微条。n型硅片的整个底面掺入杂质后,制成n型重掺杂n<sup>+</sup>层,其外层也附有一层铝,作为电极接触。这样制成了表面均匀条形的pn结型单边读出的探测器。



- 中间部分的耗尽层是探测器的灵敏区,当在这些条型pn结加上负偏压时,耗尽层在外加电场的作用下,随着电压升高而变厚。当电压足够高,耗尽层几乎扩展到整个n-型硅片,基本达到了全耗尽,死层变得非常薄。因为其内部可移动的载流子密度很低,电阻率很高,漏电流非常小(好的硅微条探测器漏电流小于**100pA**)。外加电压几乎全部加到耗尽区上,形成很高的电场。
- 在无辐射电离时,基本没有信号产生。当有带电粒子穿过探测器的灵敏区时,将产生电子-空穴对,在高电场的作用下,电子向正极(底板)漂移,空穴向靠近径迹的加负偏压的微条漂移,在这很小的区域内(探测器厚度在**300μm**左右)收集电荷只需很短的时间(几**ns**左右)。在探测器的微条上很快就读出了这个空穴(实为电子)运动产生的电荷信号。读出电子学得到这个电荷信号,经过前置放大器将信号放大,再经过模拟通道,比较器,模数转换(ADC)后读入计算机。

## ■ 探测器厚度选择

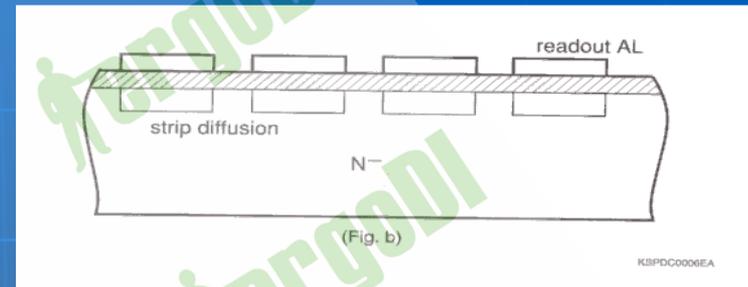
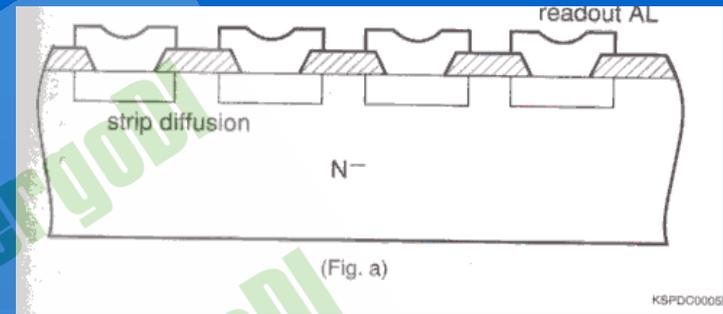
在设计、制作和使用硅微条探测器时需要考虑的一个重要原则问题是带电粒子在半导体探测器中的散射角度与探测器的厚度问题。

因为半导体的密度比较大,带电粒子穿过探测器时,在探测器内部要经过多次散射。

- 如果带电粒子的能量不高,探测器比较厚,粒子在探测器内经过很多次散射后,角度偏转比较大,这将不利于粒子的径迹和顶点精确测量。
- 如果探测器太薄了,虽然散射次数减少,偏转角度小了,但探测效率降低了,能量分辨也差了。
- 因此,一定要根据被探测粒子的能量及实验对散射偏转角度的要求,恰当的选择探测器厚度。

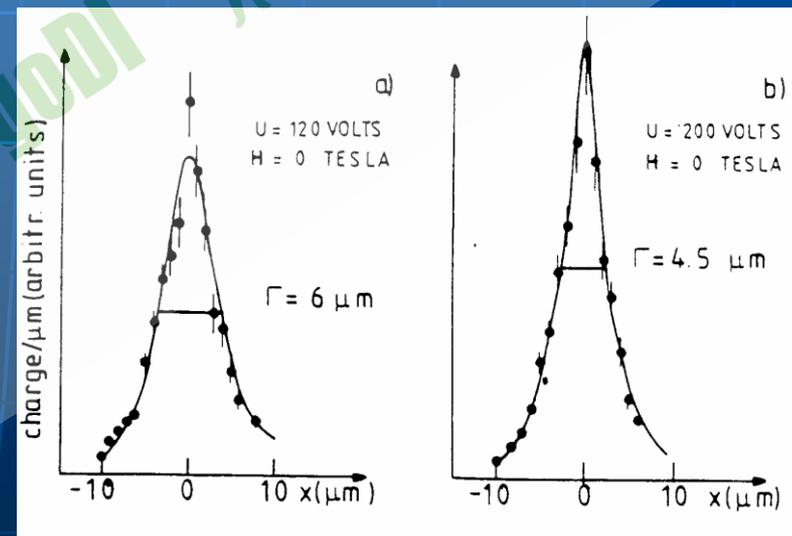
## ■ 读出方式

- 直流耦合**DC**: 铝电极与独立的扩散层直接接触
- 交流耦合**AC**: 铝电极与每个扩散层以电容耦合方式接触。**AC**读出的优点是每个二极管的漏电流不会流到读出电极上, 因而噪声小。不过偏压加载要有特殊方式

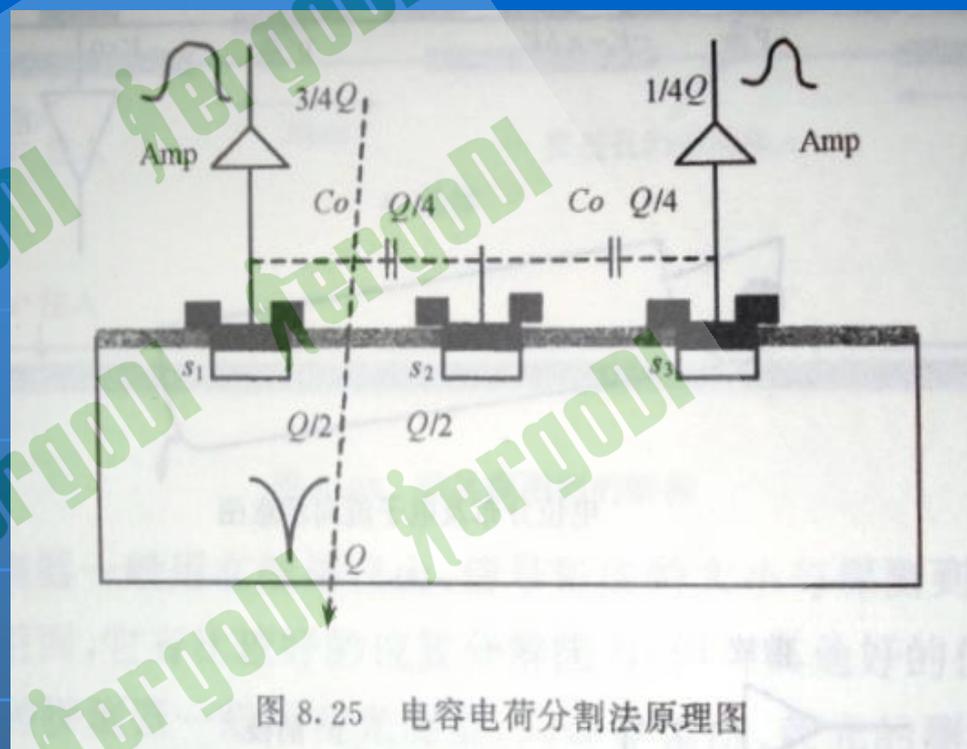


## ■ 单条读出与双条读出

- 单条读出: 条宽 $\sqrt{12}$
- 双条读出位置分辨好。
- **SMD**漂移快, 扩散小, 电荷分布窄,  $\sim 10\mu\text{m}$
- 偏压太低时, 非耗尽层厚, 信噪比差, 分辨低; 太高时, 不再改善电荷收集, 但减少了扩散, 单条事例增多, 位置分辨也变差



- 逐条读出需太多电子学
- 可采用隔几条读出的方式（电容耦合），用重心法也可得到很好的位置分辨



## ■ 硅微条探测器的一些技术指标

以LEP上的探测器为例，应要求不同，它们的性能指标并不是最高的，但性能比气体探测器还是好得多。

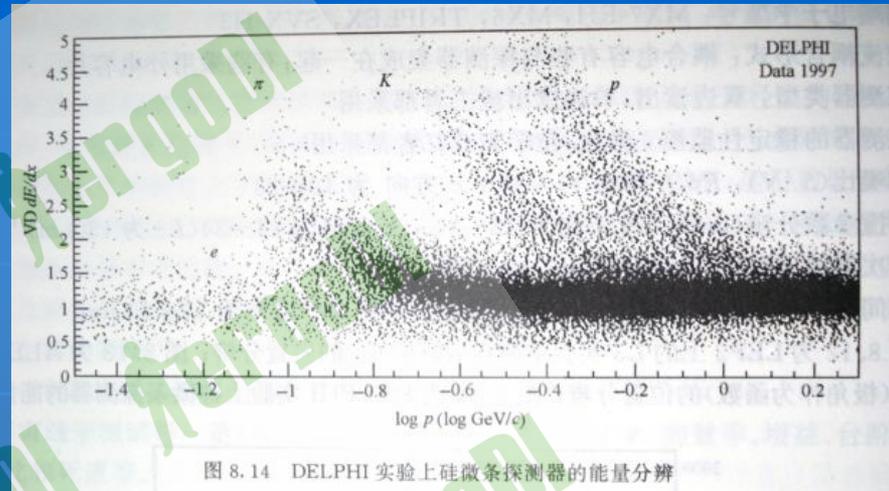


图 8.14 DELPHI 实验上硅微条探测器的能量分辨

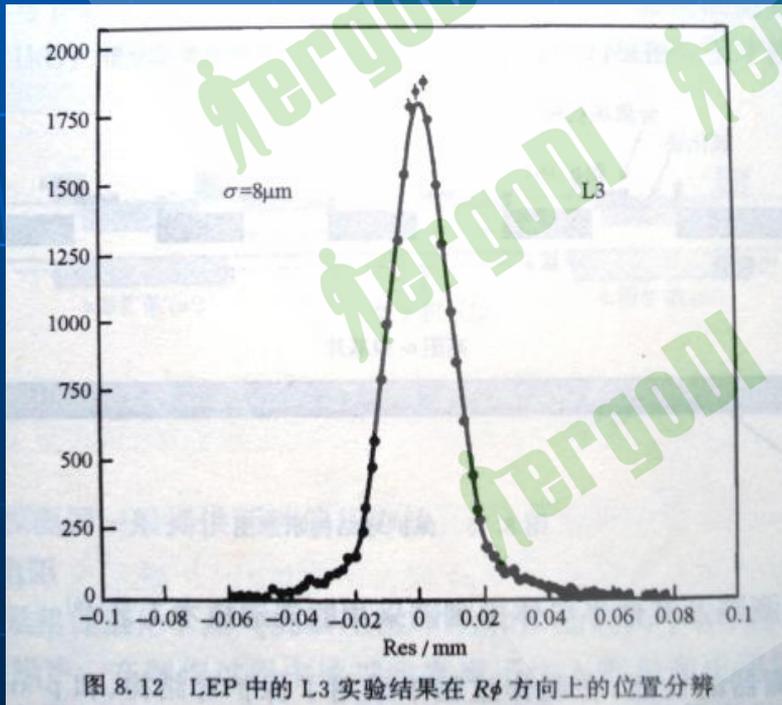


图 8.12 LEP 中的 L3 实验结果在  $R\phi$  方向上的位置分辨

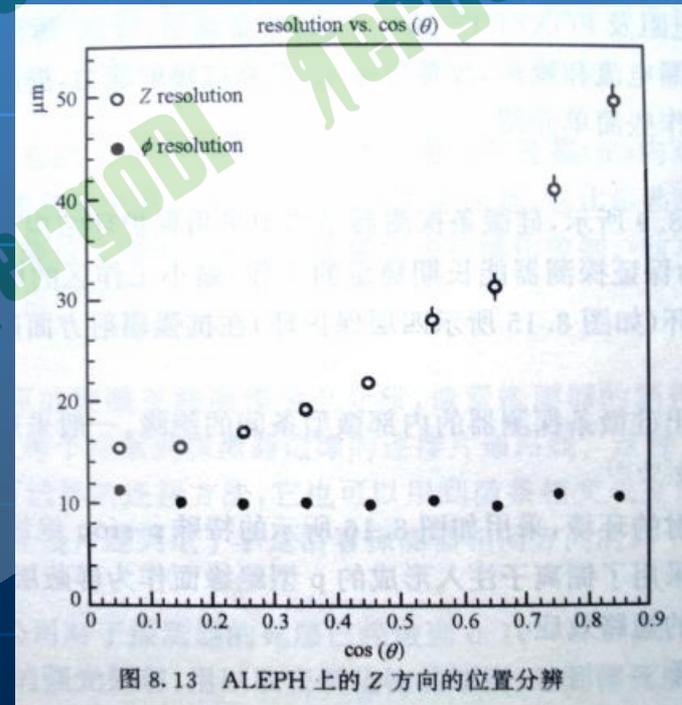


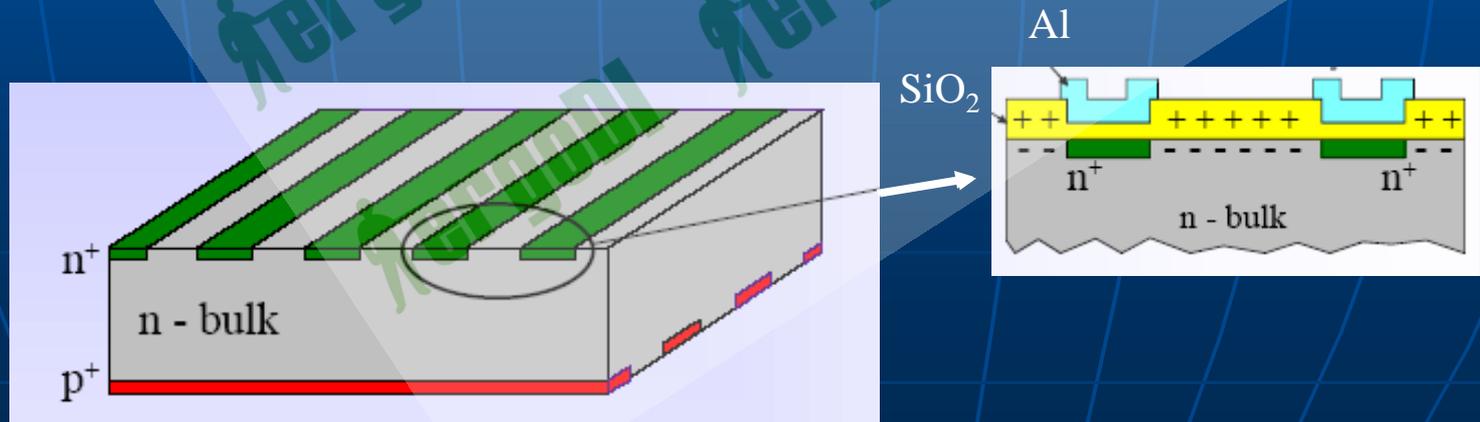
图 8.13 ALEPH 上的 Z 方向的位置分辨

## § 5-3 半导体探测器的发展

- 探测器技术及半导体各种技术工艺和光刻技术的发展, 硅微条及一些相关的半导体探测器都得到了快速的发展和应用。如双边读出的硅微条探测器、像素探测器、硅漂移室、**CCD**、硅片探测器。

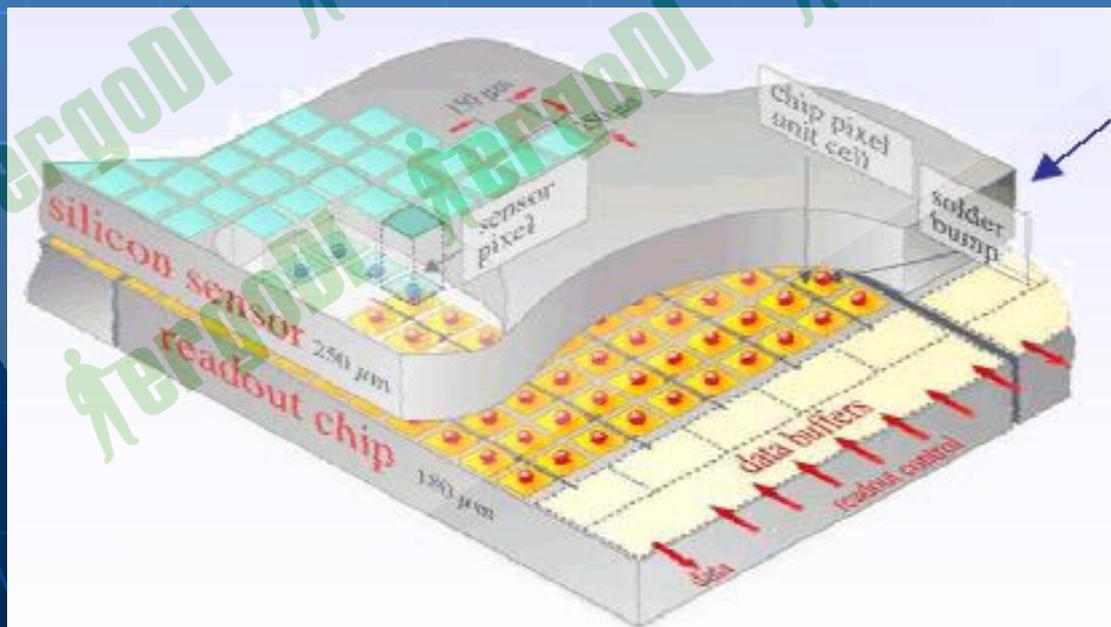
# 1. 双边读出的硅微条探测器

- 双边读出的硅微条探测器也是基于pn结的工作原理, 在一片n型硅片的两面, 通过先进的技术工艺, 分别制成重掺杂 $p^+$ 型和 $n^+$ 型微条。有 $p^+$ 型和 $n^+$ 型上下两层读出条, 这两层读出条相交成一定的角度, 具有两维的位置测试能力。
- 它的结边(**p-side**) 的结构设计特征像单边读出的微条探测器; 而欧姆边(**n-side**), 为防止条之间的短路, 需要复杂的设计及技术工艺, 其中包括条之间的电子学绝缘问题。
- 双边读出的硅微条探测器的工作原理也是因为加负偏压, 实现基本全耗尽, 动态电阻很大, 漏电流很小, 同时减小了电容, 压低噪声。



## 2. 像素(Pixel) 探测器

- 像素探测器也是根据pn结的原理研制成功的, 它的内部是由许多精心设计好的非常小的pn结(二极管)组成。它能够非常快的提供两维的信息。每一个小室(cell) 都连接它自己的读出电子学。这样制成的像素探测器对于高多重性、高事例率的实验是非常有用的。
- 它不像双层硅微条探测器那样, 在多个粒子同时打到探测器的一个读出条有时会出现位置分辨模糊。像素探测器具有非常好的位置分辨率, 但在每单位面积上需要大量的电子学路数。
- 这种像素探测器只用单边的技术工艺而提供了两维的高位置分辨率。已经被用到LHC 高能物理实验中。

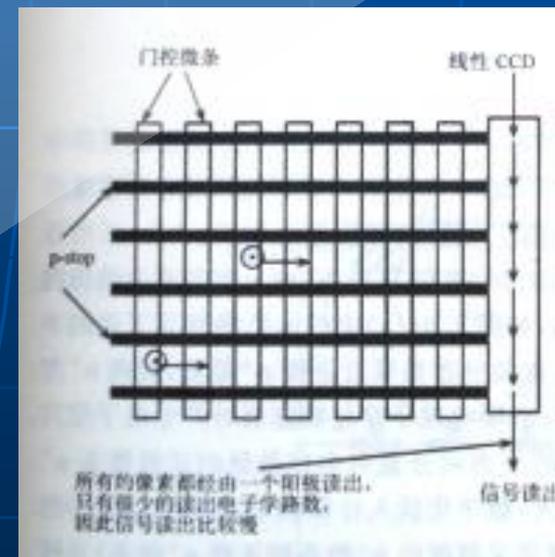
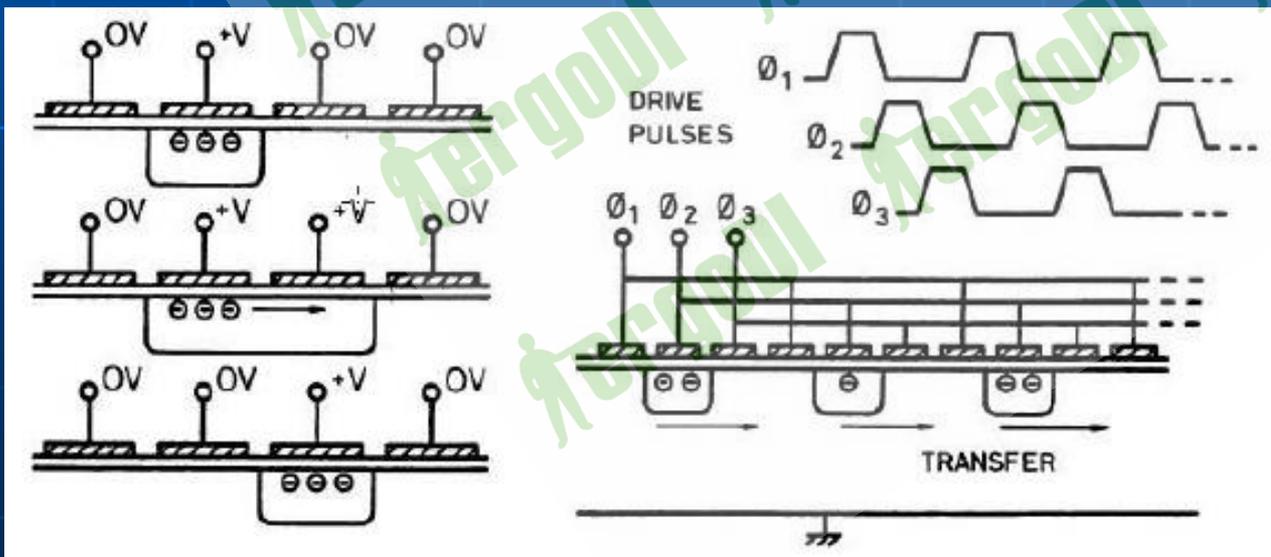


### 3. 电荷耦合器件CCD

- **CCD** 已经使用几十年了, 过去多用在光测量和摄像机上, 即使在高能物理中的应用, 也是作为火花室和流光室的径迹图像记录。
- 近些年科学家们已直接把它用作高能物理探测器, 如**SLD VXD3** 探测器, 采用**96 CCD'S**  $\times 3.2 \times 10^8 = 3.07 \times 10^8$  个像素( $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ ) 每个**CCD** 读出通过**4** 个输出结, **8** 位**FADC**, 全部读出时间是**200ms**。
- 日本**KEK** 计划用它来作为未来实验的顶点探测器, 位置分辨率设计为**2 $\mu\text{m}$** 。
- **CCD** 作为粒子探测器, 探测的不再是光, 而是带电粒子, 所以它的结构也有些变化。当带电粒子射入探测器时, 产生电子空穴对, 电荷传输在**CCD** 很薄的耗尽区内进行。
- **CCD**的结构是在一块硅片上集成很多的**MOS**(金属—氧化物—半导体)器件, 每个**MOS**器件类似一个小半导体探测器。

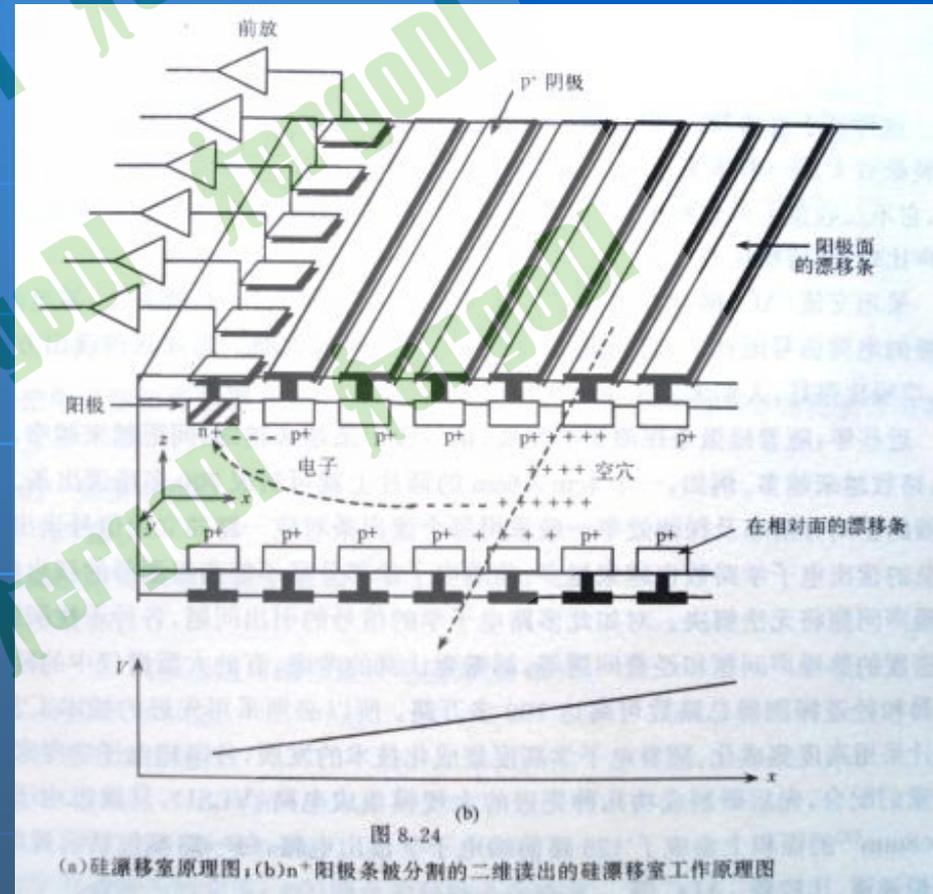
# CCD的工作原理

CCD的单元很小，只有几个 $\mu\text{m}^2$ ，间距 $3-5\mu\text{m}$ ，相邻单元加不同电压时会使它们收集的电荷相互转移，加一组三重周期性变化的驱动脉冲电压，使电荷定向移向边缘的信号输出电极。因为信号输出电极及读出电子学路数都少，因此这种探测器的信号读出比较慢。CCD的灵敏度较低，只有达到 $10^3$ 电子/单元的电荷才能被记录，故常要与多级微通道倍增器组合使用。



## 4. 硅漂移室 Silicon Drift detector

- 硅漂移室是在n型的硅片的两个表面, 注入杂质, 形成重掺杂p<sup>+</sup>条。
- 在边缘形成一个n<sup>+</sup>微条与中间未耗尽区相连, 当外加一定的负偏压后, 使整个硅片实现全耗尽。硅片内部的电位分布, 在z方向成为抛物线型, 中心的电位最低而靠近两个表面的部位最高。
- 当带电粒子穿过探测器时产生电子空穴对, 电子就会落入低电位的谷中, 然后沿着电场的x方向分量向微条n<sup>+</sup>漂移, 形成电信号。



- 通过测量电子的漂移时间及被分割开的 $n^+$ 读出微条上的坐标就得到了入射粒子的二维位置信息。另外,电子在耗尽区漂移很长距离才到达面积很小的正电极,电极之间的电容很小,因此噪声减小,有利于提高能量分辨率。
- 普通的半导体探测器的计数率一般在几十kHz 以下,硅漂移室由于其电容小,相应的脉冲成形时间也很短(大约为**100ns**),硅漂移室的漂移时间虽然比较长,但它的计数率并不受此影响,硅漂移室允许计数率比一般的半导体探测器高几十倍。它的时间分辨可小于**1ns**,并且它有两维的位置分辨,其中按漂移方向的位置分辨率可达到几个 **$\mu\text{m}$** 。
- 它的缺点是电极结构复杂,探测器价格较高。
- 它的结构可分为以下几种类型:
  - ①一维读出型
  - ②阳极被分割的两维读出型
  - ③圆型
  - ④ 多单元阵列型

## SVT (Silicon Vertex Tracker)

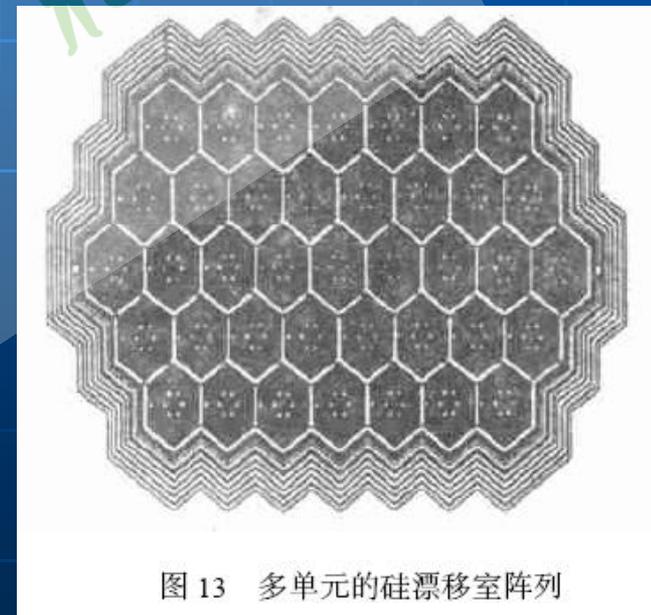
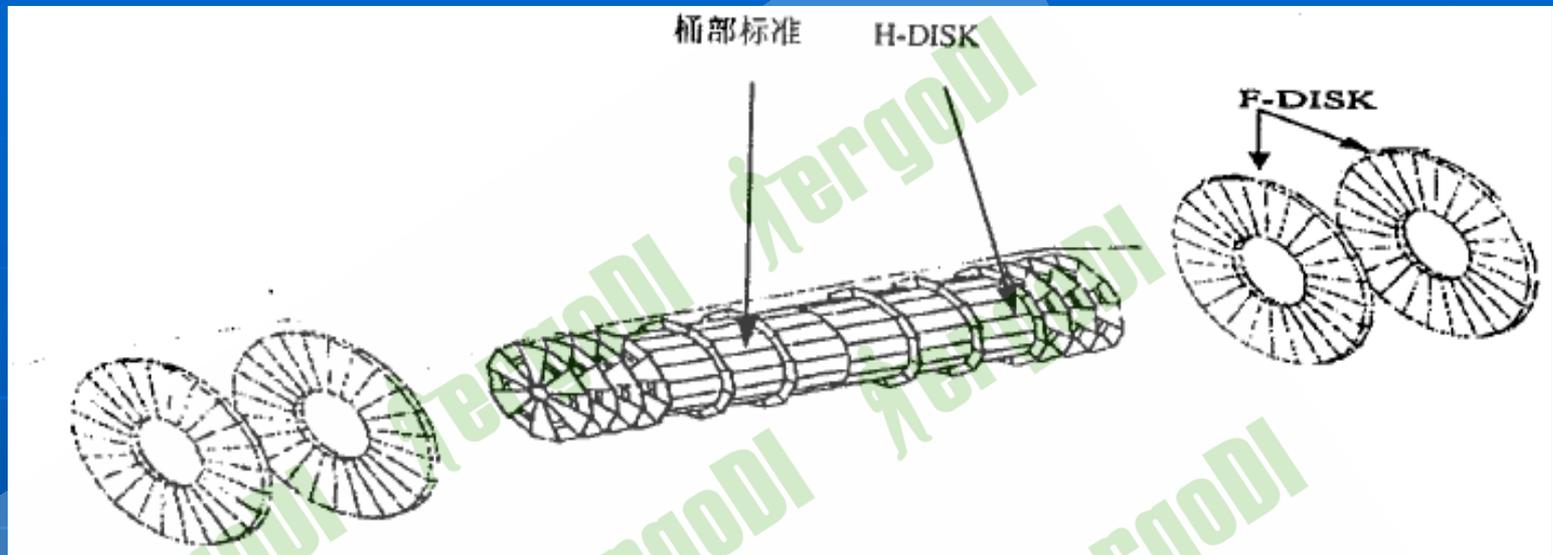


图 13 多单元的硅漂移室阵列

## § 5-4 半导体探测器的应用

# 半导体探测器在高能物理实验中的应用

- 因为硅微条等新型半导体探测器的位置分辨率比气体探测器、闪烁探测器的位置分辨率高一到两个数量级，所以在近十几年来，世界各大高能物理实验室都采用它作为顶点探测器。如美国的**FERMI LAB** 的**CDF** 和**D0** 实验，**SLAC**实验室的**B** 介子工厂的**BaBar** 实验，欧洲高能物理中心**CERN** 的**LEP**正负电子对撞机上的**L3**、**ALEPH**、**DELPHI**、**OPAL**和正在建造的质子—质子对撞机**LHC**的**ATLAS**、**CMS**及日本高能物理实验室**KEK**，德国的**HARA**、**HARAB**实验等全采用了它。
- **LHC**的**ATLAS**、**CMS**采用硅微条探测器代替漂移室作径迹测量。



美国费米实验室D0实验采用硅微条探测器作顶点探测器。为了增大覆盖立体角,除了桶部设计得比较长外,还设计了**H-DISK**和**F-DISK**。这个顶点探测器所用的硅微条探测器都是用交流耦合输出的,其桶部是采用单边读出的硅微条探测器,而**H-DISK**和**F-DISK**部分是采用双边读出的硅微条探测器。读出电子学都是采用集成电路**SVXIIb**,每一片**SVXIIb**就有**128**路读出。

# 大面积 $\gamma$ 射线太空望远镜

## GLAST

### Gamma-ray Large Area Space Telescope

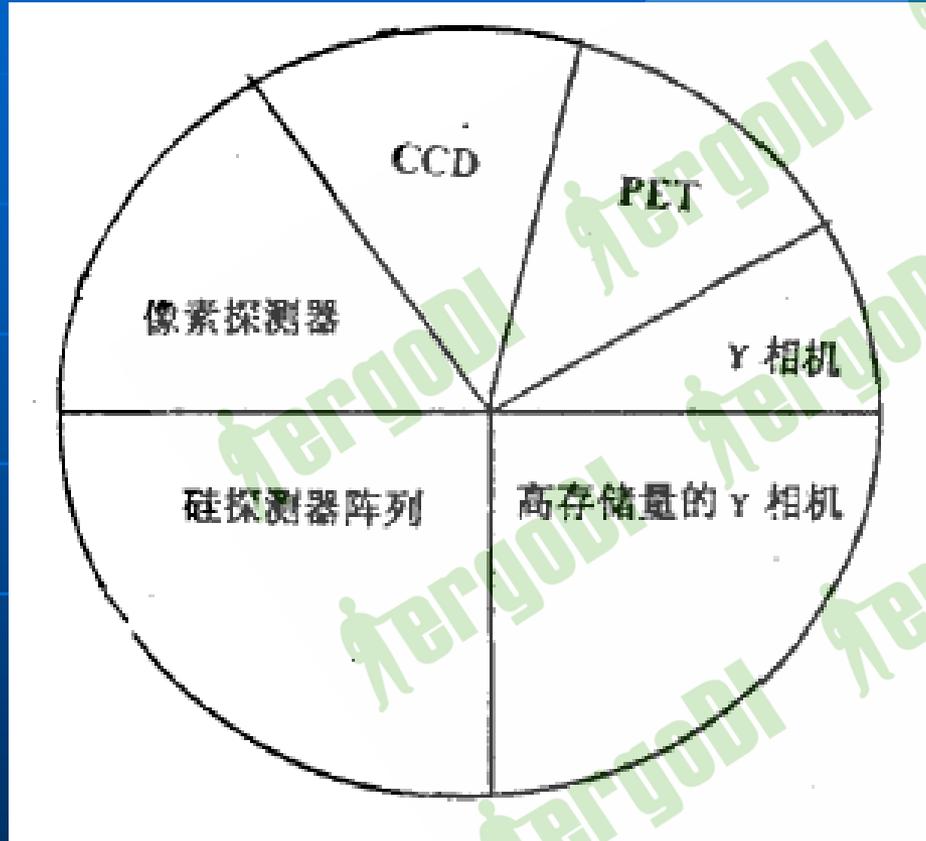


由美国**NASA**和能源部支持及法国、意大利、日本、瑞典等参加的**GLAST** 实验组, 为了研究宇宙中能量在**20—300 GeV** 的 $\gamma$ 射线等, 研制了**GLAST**, 其核心部分使用了多层硅微条探测器, 总面积大于**80m<sup>2</sup>**, 共**130** 多万路读出。主要用来作为



的对转换过程的径迹测量望远镜。

# 在核医学中的应用



1996—1999核医学领域  
应用各种探测器的统计概况

- 透射法 (X/γ 穿过人体) :

  - X光透视、γ-CT等

- 放射法 (短寿命同位素  
注入人体) : PET

- 要直接从图像中分辨出恶性细胞和正常细胞的差异, 要求探测器的空间分辨达到  $\mu\text{m}$  量级。目前只有硅微条探测器、像素探测器、CCD 等半导体探测器才能达到。硅微条探测器的点位置分辨  $\sigma = 1.25 \mu\text{m}$ 。

## 硅微条X光扫描系统及用该系统获得的鼠头颅像

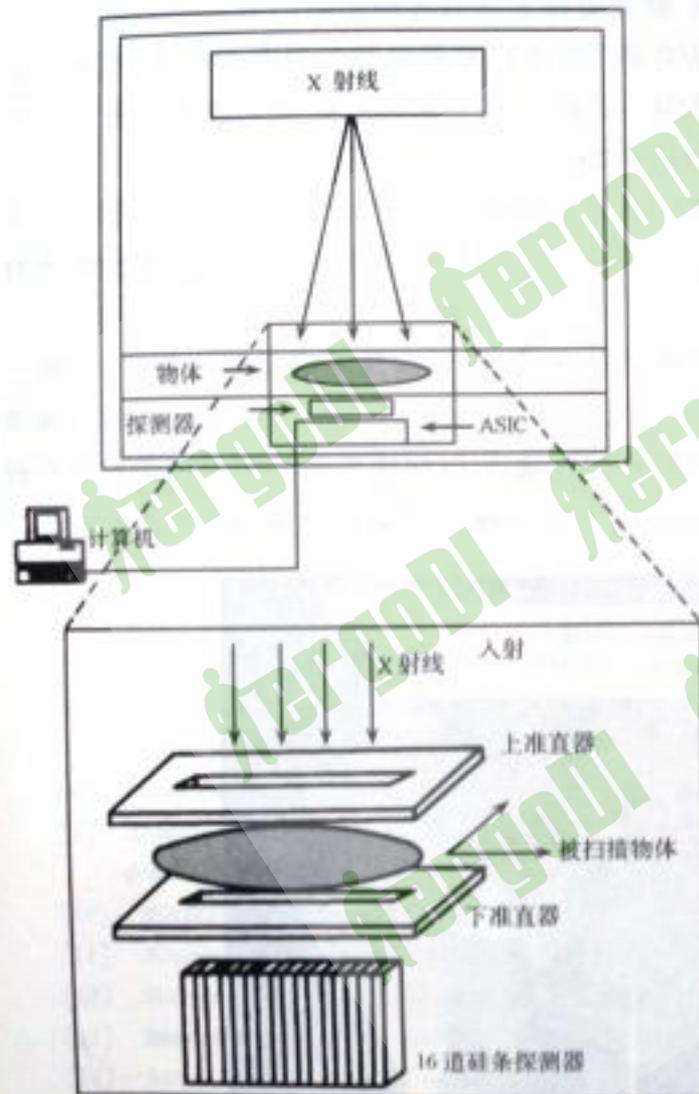


图 8.34 硅微条探测器建立的 X 射线扫描图像系统

# 小结

- 半导体探测器的种类很多，但大多数是基于加反向偏压的**PN结**。
- 探测器的灵敏区就是结型探测器的耗尽区，其中载流子浓度极低，电阻率很高，电场强度很大。灵敏区厚度确定了能探测粒子的最大能量。

半导体探测器有突出的优点：

- 1) 非常好的位置分辨率；
- 2) 很高的能量分辨率；
- 3) 很宽的线性范围；
- 4) 非常快的响应时间。

- 因以上优点，半导体探测器在粒子物理与核物理实验中得到广泛应用，在天体物理、宇宙线科学、核医学数字成像技术等领域的应用也迅速发展。